第 37 卷第 2 期
2017 年 1 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.2
Jan.,2017

DOI: 10.5846/stxb201507291595

董志军,杨青,孙婷婷,王玉珏,姜会超,刘东艳.黄河口邻近海域浮游动物群落时空变化特征.生态学报,2017,37(2):659-667.

Dong Z J, Yang Q, Sun T T, Wang Y J, Jiang H C, Liu D Y.Spatial and seasonal variability of the zooplankton community in the Yellow River Estuary′s adjacent sea.Acta Ecologica Sinica,2017,37(2):659-667.

黄河口邻近海域浮游动物群落时空变化特征

董志军[1,*],杨　青[2],孙婷婷[1,3],王玉珏[1],姜会超[4],刘东艳[1]

1 中国科学院烟台海岸带研究所,烟台　264003

2 国家海洋环境监测中心,大连　116023

3 烟台大学,烟台 264005

4 山东省海洋资源与环境研究院,烟台　264006

摘要:利用 2012 年 12 月—2013 年 9 月 4 个季度的现场调查资料研究了黄河口邻近海域浮游动物群落的时空分布特征。研究表明,黄河口邻近海域共鉴定出浮游动物 70 种,包括浮游幼虫 19 类。浮游动物优势种主要由夜光虫(*Noctiluca scintillans*)、小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)、双刺纺锤水蚤(*Acartia bifilosa*)、拟长腹剑水蚤(*Oithona similis*)、强额拟哲水蚤(*Paracalanus crassirostris*)、近缘大眼剑水蚤(*Corycaeus affinis*)、强壮箭虫(*Sagitta crassa*)、双壳类幼体(Bivalvia larvae)、多毛类幼体(Polychaeta larvae)等种类。黄河口邻近海域浮游动物丰度夏季最高(60620 个/m^3),春季(31228 个/m^3)和秋季(21540 个/m^3)次之,冬季最低(7594 个/m^3)。不同季节浮游动物丰度的空间分布具有差异性,春季浮游动物丰度呈现出从近岸到外海降低的趋势;夏季浮游动物形成两个高丰度区,分别位于河口邻近海区和河口东部海区;秋季和冬季浮游动物丰度高值区均位于河口东部海区。浮游动物生物多样性指数均呈现从河口到外海升高的趋势,低值区位于黄河口入海口附近海区。相关性分析显示,黄河口邻近海域浮游动物丰度与海水温度显著正相关($r=0.212, P<0.05$),表明温度为影响黄河口邻近海域浮游动物丰度变化的主要因素。

关键词:浮游动物;黄河口;时空分布;优势种

Spatial and seasonal variability of the zooplankton community in the Yellow River Estuary′s adjacent sea

DONG Zhijun[1,*], YANG Qing[2], SUN Tingting[1,3], WANG Yujue[1], JIANG Huichao[4], LIU Dongyan[1]

1 *Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai* 264003, *China*

2 *National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian* 116023, *China*

3 *Yantai University, Yantai* 264005, *China*

4 *Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai* 264006, *China*

Abstract: The unusual dynamic conditions in estuaries cause their zooplankton distribution, as well as the zooplankton distribution in the adjacent sea, to be spatially and temporally heterogeneous. To investigate this heterogeneity in the adjacent sea of the Yellow River Estuary, zooplankton samples were collected from there in December 2012, April 2013, June 2013, and September 2013. The samples were collected using a plankton net with mesh size 0.160 mm, while during the four cruises, environmental parameters such as seawater temperature, salinity, and chlorophyll a concentration were determined. Spearman rank correlations were used to analyze the relationship between zooplankton abundance and various

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA11020405,XDA05130703);国家自然科学基金项目(41206086)

收稿日期:2015-07-29;　　**网络出版日期:**2016-06-13

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zjdong@ yic.ac.cn

environmental factors. Overall, 70 zooplankton species were identified, including 19 pelagic larvae. The copepods were the most abundant group, representing 30%, followed by hydromedusae. For the study region, the most dominant organisms were *Noctiluca scintillans*, *Paracalanus parvus*, *Acartia bifilosa*, *Oithona similis*, *Paracalanus crassirostris*, *Corycaeus affinis*, *Sagitta crassa*, Bivalvia larvae, and Polychaeta larvae. Among these, *P. parvus*, *A. bifilosa*, and *O. similis* dominated the zooplankton communities for three of the measured seasons. Furthermore, the composition of dominant species varied with seasons, with the seasonal turnover rate of dominant zooplankton species being high (67%—88%). The abundance of *P. parvus* averaged 9320 ind/m^3 in summer, 3704 ind/m^3 in autumn, 3891 ind/m^3 in winter, and 165 ind/m^3 in spring. For the Yellow River mouth, *P. parvus* reached the greatest abundance in summer, while for the eastern sea area, this occurred in autumn and winter. Furthermore, the abundance of *A. bifilosa* averaged 40218 ind/m^3 in summer, 17815 ind/m^3 in spring, and 2127 ind/m^3 in winter. In spring, the abundance of *A. bifilosa* showed a decreasing trend from the Yellow River mouth to the outer sea area. For the Yellow River mouth, this species reached its highest abundance in summer, whereas for the eastern sea area, this occurred in winter. In addition, the abundance of *O. similis* averaged 4245 ind/m^3 in summer, 2776 ind/m^3 in spring, 1154 ind/m^3 in winter, and 88 ind/m^3 in autumn. In spring, *O. similis* reached the highest abundance in the both sides of the Yellow River mouth, while for the Yellow River mouth this occurred in summer and for the eastern sea area in winter. *N. scintillans* dominated the zooplankton community in spring and summer. The abundance of *N. scintillans* averaged 28194 ind/m^3 in spring and 13679 ind/m^3 in autumn. In spring, *N. scintillans* reached the highest abundance in the southern area of the Yellow River mouth, whereas for the eastern sea area, this occurred in autumn. Overall zooplankton abundance averaged 60620 ind/m^3 in summer, 31228 ind/m^3 in spring, 21540 ind/m^3 in autumn, and 7594 ind/m^3 in winter, while its spatial distribution varied among the four seasons. In spring, zooplankton abundance showed a decreasing trend from the Yellow River mouth to the outer sea area. In summer, zooplankton density was higher in the Yellow River mouth and the eastern sea area. The higher zooplankton abundance occurred in the eastern sea area in autumn and winter. The zooplankton community's diversity index (H') showed an increasing trend from the Yellow River mouth to the outer sea area. Finally, the zooplankton abundance had a clear positive correlation with the seawater temperature ($r = 0.212$, $P < 0.05$), suggesting that for the Yellow River Estuary, seawater temperature was one of the main factors determining zooplankton abundance.

Key Words: zooplankton; Yellow River Estuary; spatial and temporal distribution; dominant species

黄河口及其邻近海域地处暖温带北缘,位于渤海湾和莱州湾的交汇处,该水域受黄河冲淡水和渤海高盐水的共同影响。同时,该海域也是黄渤海渔业生物资源重要的产卵场和育幼场。然而,受自然因素和人类活动的双重影响,黄河口附近海域的生态环境已经发生了很大改变。如:近年来黄河入海径流量和输沙量呈现大幅下降的趋势,引起黄河三角洲岸线变迁,邻近海域环流场发生改变,并影响渔业资源[1];黄河口附近大规模围垦滩涂、围海、海岸工程和海上采油平台建设等人类活动的增加,也给黄河口及其邻近海域环境生态带来严重的负面影响[2-3]。

浮游动物是河口生态系统的重要类群,也是食物链的关键环节,浮游动物的动态变化影响许多鱼类和无脊椎动物的种群生物量,因而浮游动物在河口生态系统结构、功能和生源要素循环中起着重要作用[4-5]。目前,国内已有多位学者对黄河口邻近海域的浮游动物进行了调查研究[6-11],分析了不同季节黄河口附近海域浮游动物的种类组成、数量分布及其与环境因子的关系。另外,多位国内学者在渤海及莱州湾的浮游动物调查中也对黄河口邻近海域的部分海区开展了研究[12-15]。然而,以往的研究往往基于单个或两个季节的浮游动物资料进行分析,而黄河口邻近海域浮游动物的季节变化特征尚未见报道。本研究利用 2012 年 12 月至 2013 年 9 月在黄河口邻近海域开展的海洋生态综合调查所获得的浮游动物资料,对浮游动物的种类组成和数量的时空分布特征及其与环境因子的关系,本研究将为黄河口邻近海域海洋生物资源可持续利用提供基础

资料和科学依据。

1　材料与方法

1.1　样品采集与分析

于 2012 年 12 月(冬季)、2013 年 4 月(春季)、2013 年 6 月(夏季)、2013 年 9 月(秋季),在黄河口邻近海域开展了 4 个航次的综合生态调查。依据黄河冲淡水的扩散特征,从河口到离岸海域共布设 6 个调查断面(A—F)、29 个站位(图 1)。调查海区平均水深 11 m,最浅处 4 m 左右,最深处 18 m 左右。

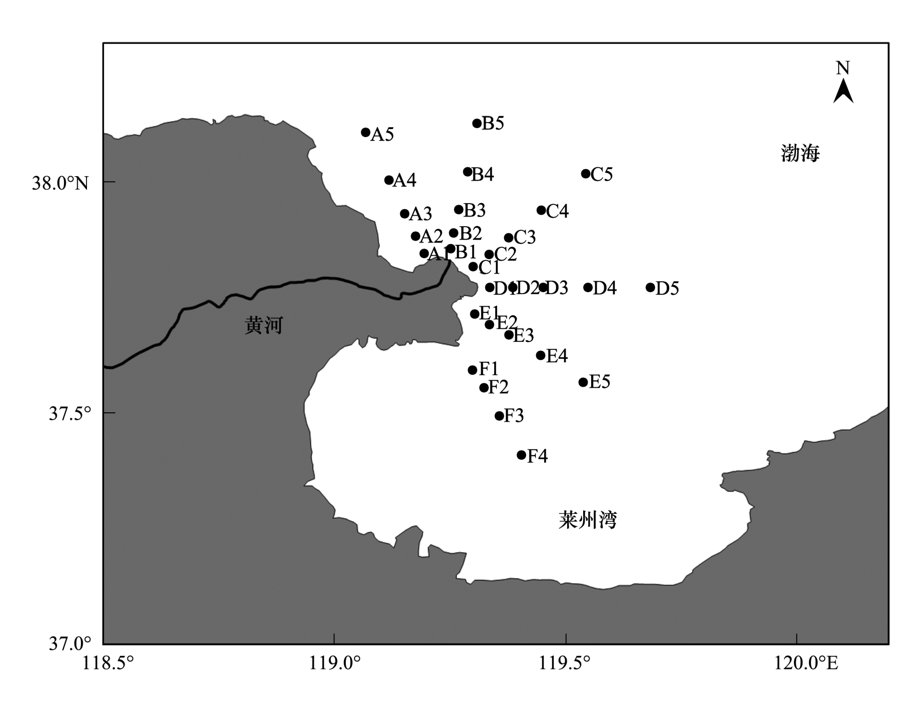


图 1　黄河三角洲邻近海域站位示意图

Fig.1　Sampling stations in the Yellow River Estuary's adjacent sea

浮游动物样品采集使用浅水Ⅱ型浮游生物网(网目孔径 0.160 mm,网口内径 31.6 cm,网长 140 cm)自海底至海面垂直拖取,5%福尔马林海水溶液固定保存。体视显微镜下进行样品鉴定和计数(浮游幼体鉴定到类,其它类别鉴定到种),得出各种类丰度值(个/m^3)。调查海区海水温度、盐度、深度数据用 YSI-600 型多参数水质监测仪现场测定,叶绿素 a 浓度采用分光光度法测定。

1.2　数据处理

浮游动物优势种根据每个种的优势度(Y)来确定,计算公式为:$Y=(n_i/N)\times f_i$;式中 n_i 为第 i 种的个体数,N 为所有种类总个体数,f_i 为该种在各站位中的出现频率,定义 Y 值大于 0.02 的种类为本次调查的优势种。优势种更替率(R)计算公式为:$R=(a+b-2c)/(a+b-c)\times100\%$;式中 a 和 b 分别为相邻两季节的优势种数,c 为相邻两季节共同的优势种数。

物种多样性指数采用 Shannon 多样性指数(H'),其计算公式为:$H' = -\sum_{i=1}^{s} p_i \times \log_2 p_i$;物种均匀度($J$)采用 Pielou 的计算公式:$J = \frac{H'}{\log_2 S}$;式中 S 为样品中总种类数,p_i 为第 i 种的个体数与样品中的总个数的比值。

浮游动物丰度与环境因子的相关性分析采用 Spearman 等级相关检验,在软件 SPSS 19.0 中完成。浮游动物丰度、物种多样性平面分布图均采用 Surfer 12.0 软件绘制。

2 结果

2.1 种类组成与优势种

2012 年—2013 年,黄河口附近海域 4 个航次调查结果共鉴定出浮游动物 70 种(包括浮游幼体 19 类),其中桡足类种类最多(21 种),占总种数的 30%;其次是水螅水母类(15 种),占总种数的 21.4%;而枝角类、毛颚类、等足类、端足类、糠虾类、被囊类、涟虫类、栉水母类等种类也有分布。调查期间,春季鉴定有浮游动物 29 种,夏季 42 种,秋季 38 种,冬季 20 种。

调查结果发现,黄河口邻近海域浮游动物优势种为夜光虫、小拟哲水蚤、双刺纺锤水蚤、拟长腹剑水蚤、强额拟哲水蚤、近缘大眼剑水蚤、强壮箭虫、双壳类幼体、多毛类幼体等种类(表 1)。其中小拟哲水蚤、双刺纺锤水蚤和拟长腹剑水蚤在 3 个季节调查种均为优势种。优势种组成随季节变化明显,调查海区各季节间的优势种更替率 R 较高(67%—88%),相邻季节共同的优势种仅为 1—2 种。

表 1 黄河口邻近海域浮游动物优势种类及其季节变化

Table 1 Seasonal variability of dominant zooplankton species in the Yellow River Estuary′s adjacent sea

物种 Species	优势度 Dominant			
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
夜光虫 *Noctiluca scintillans*	0.514	< 0.001	0.446	0
小拟哲水蚤 *Paracalanus Parvus*	0.003	0.077	0.172	0.416
双刺纺锤水蚤 *Acartia bifilosa*	0.325	0.332	0	0.210
拟长腹剑水蚤 *Oithona similis*	0.051	0.031	0.002	0.126
强额拟哲水蚤 *Paracalanus crassirostris*	< 0.001	0.027	< 0.001	0.010
近缘大眼剑水蚤 *Corycaeus affinis*	0	0	0	0.062
强壮箭虫 *Sagitta crassa*	0.001	0.001	0.026	0.017
双壳类幼体 *Bivalvia larvae*	0.017	0.008	0.141	< 0.001
多毛类幼体 *Polychaeta larvae*	0.002	< 0.001	0.020	< 0.001

黄河口邻近海域主要浮游动物优势种个体丰度的时空分布特征如图 2 和图 3 所示。小拟哲水蚤在夏季、秋季和冬季调查中均为优势种,季节变化上,夏季丰度值最高(平均值为 9320 个/m^3),秋季和冬季丰度值较低(分别为 3704 个/m^3和 3891 个/m^3),春季丰度值最低(165 个/m^3);空间分布上,夏季黄河入海口海域为其分布的高值区,秋季和冬季黄河口东部海域为其分布的高值区。双刺纺锤水蚤在春季、夏季和冬季调查中均为优势种,季节变化上,夏季丰度值最高(平均值为 40218 个/m^3),春季和冬季丰度值次之(分别为 17815 个/m^3和 2127 个/m^3),秋季丰度值最低;空间分布上,春季从黄河入海口两侧近岸海区至外海丰度呈降低趋势,夏季位于黄河入海口海域和东部海域有两个高值区,而冬季黄河口东部海域为高值区。拟长腹剑水蚤在春季、夏季和冬季调查中均为优势种,季节变化上,夏季丰度值最高(平均值为 4245 个/m^3),春季和冬季丰度值次之(分别为 2776 个/m^3和 1154 个/m^3),秋季丰度值最低(88 个/m^3);空间分布上,春季丰度高值区位于黄河入海口两侧海域,夏季位于黄河入海口海域为丰度高值区,而冬季黄河口东部海域为高值区。夜光虫在春季和秋季调查中为优势种,丰度值分别为 28194 个/m^3和 13679 个/m^3;空间分布上,春季夜光虫高丰度值区主要位于黄河口入海口南侧海域,秋季夜光虫高丰度值区主要位于黄河口东部海域。

2.2 浮游动物丰度时空分布

春季,调查海区浮游动物平均丰度为(31228±27096)个/m^3,高丰度区位于黄河入海口两侧近岸海区,而外海区丰度至较低,表现出从近岸到外海降低的趋势(图 4)。黄河入海口两侧近岸海区重要种类为夜光虫和双刺纺锤水蚤。夏季,调查海区浮游动物平均丰度为(60620±158365)个/m^3,形成两个浮游动物高丰度区,分别位于河口邻近海区和河口东部海区(图 4),主要优势种类为双刺纺锤水蚤,占该站位总丰度的 66.3%,另外还有小拟哲水蚤、强额拟哲水蚤等。秋季,调查海区浮游动物平均丰度为(21540±42708)个/m^3,高丰度区主

要位于河口东部海区,而河口邻近海域浮游动物丰度较低(图 4),主要种类有夜光虫、小拟哲水蚤和双壳类幼体。冬季,调查海区浮游动物平均丰度为(7594 ± 14632)个/m^3,位于河口东北部海区形成相对高值区(图 4),主要种类有小拟哲水蚤和双刺纺锤水蚤。

2.3 生物多样性时空分布

黄河口邻近海域浮游动物群落物种多样性指数和均匀度指数的时空分布特征如表 2 和图 5 所示。四季调查结果比较表明,冬季生物多样性指数最高,秋季次之,而春季和夏季较低,均匀度指数的季节变化特征与生物多样性指数相似。春季,调查海区浮游动物群落物种多样性指数 H'平均值为 1.60(表 2),高值区位于黄河入海口东部海区,从近岸海区到外海区呈现升高趋势(图 5)。夏季,调查海区浮游动物群落物种多样性指数 H'平均值为 1.58(表 2),从黄河入海口近岸海区到外海区逐渐升高,另外,最高值区出现在 F3 站位。秋季,调查海区浮游动物群落物种多样性指数 H'平均值为 1.97(表 2),从黄河入海口近岸海区到外海区呈现出逐渐升高的特征。冬季,调查海区浮游动物群落物种多样性指数 H'平均值为 2.32(表 2)。

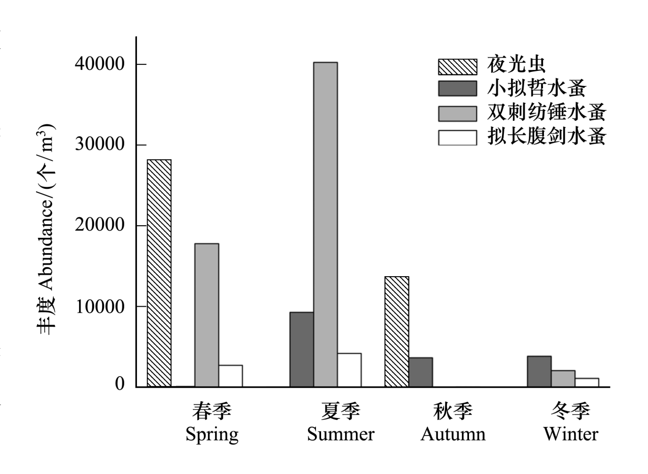


图 2　黄河口邻近海域主要浮游动物优势种丰度的季节分布

Fig.2　Seasonal distribution of dominant zooplankton abundance in the Yellow River Estuary's adjacent sea

图 3　黄河口邻近海域主要浮游动物优势种丰度的空间分布

Fig.3　Spatial distribution of dominant zooplankton abundance in the Yellow River Estuary's adjacent sea

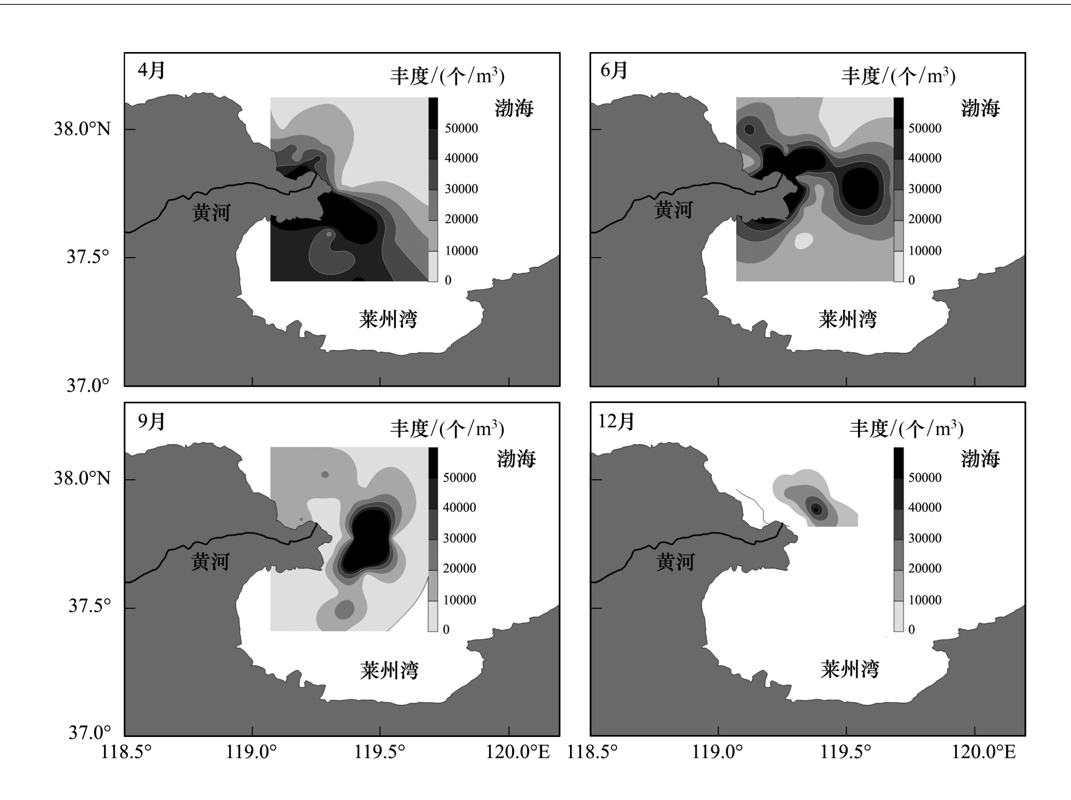


图 4 黄河口邻近海域浮游动物丰度的季节分布

Fig.4 Seasonal distribution of zooplankton abundance in the Yellow River Estuary's adjacent sea

表 2 黄河口邻近海域浮游动物群落的多样性和均匀度季节变化

Table 2 Seasonal variability of Shannon-Weaver index and of zooplankton abundance in the Yellow River Estuary's adjacent sea

季节 Season	多样性指数 Shannon-Weaver index			均匀度 Evenness index		
	平均值 Average	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	最大值 Maximum	最小值 Minimum
春季 Spring	1.60	2.74	0.60	0.46	0.70	0.19
夏季 Summer	1.58	3.12	0.56	0.37	0.69	0.14
秋季 Autumn	1.97	2.89	0.66	0.53	0.90	0.18
冬季 Winter	2.32	3.72	1.94	0.65	0.87	0.48

2.4 浮游动物分布与环境因子

分别对浮游动物丰度和海水温度、海水盐度、水深、叶绿素进行相关性分析,分析结果如表 3 所示。结果表明:浮游动物丰度与海水温度显著正相关($r=0.212, P<0.05$)。

表 3 黄河口邻近海域浮游动物与环境因子的相关性

Table 3 The relative analysis of the zooplankton abundance and the environmental factors

环境因子 Environmental factors	浮游动物丰度 Zooplankton abundance	海水温度 Temperature	海水盐度 Salinity	水深 Depth	叶绿素 Chl a
浮游动物丰度 Zooplankton abundance	1.000				
海水温度 Temperature	0.212*	1.000			
海水盐度 Salinity	−0.192	0.109	1.000		
水深 Depth	−0.185	−0.041	0.421**	1.000	
叶绿素 Chl *a*	0.069	0.586**	0.069	−0.159	1.000

* 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关, $N=100$

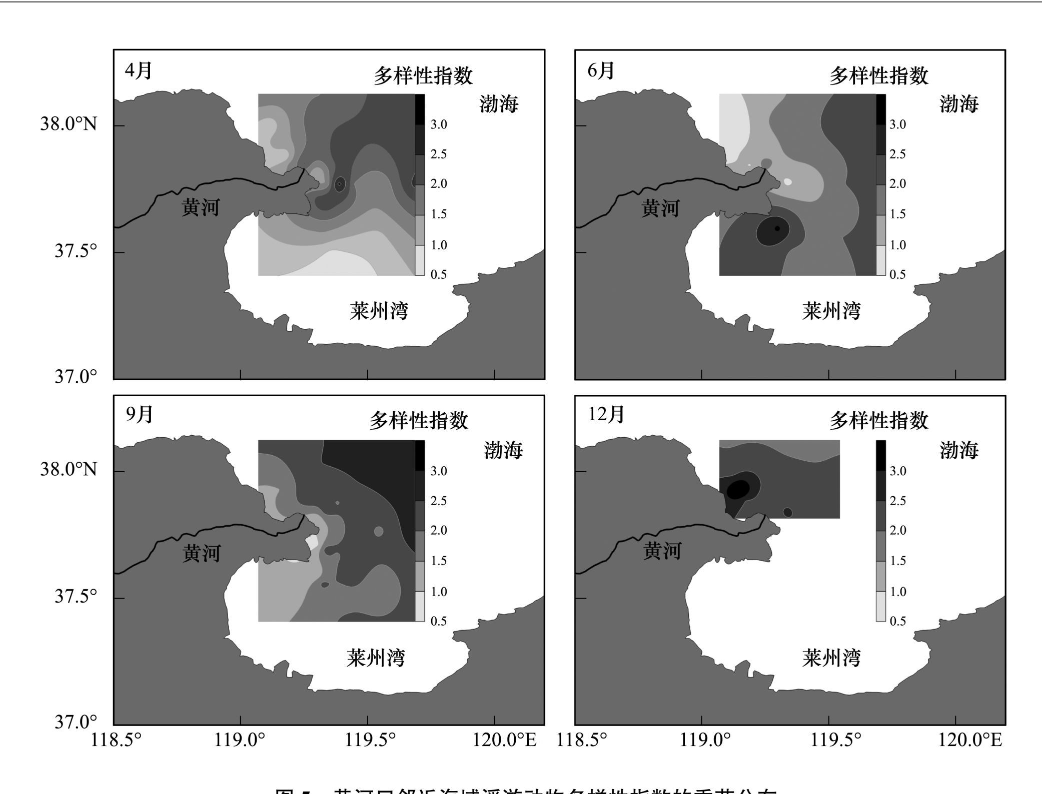


图 5　黄河口邻近海域浮游动物多样性指数的季节分布

Fig.5　Seasonal distribution of Shannon-Weaver index of zooplankton abundance in the Yellow River Estuary′s adjacent sea

3　讨论

3.1　黄河口邻近海域浮游动物季节变化特征

本次调查结果显示,黄河口邻近海域浮游动物种类数共 70 种,桡足类 21 种,水螅水母类 15 种,而枝角类、毛颚类、等足类、端足类、糠虾类、被囊类、涟虫类、栉水母类等种类数较少,这与近年来黄河口邻近海域浮游动物种类组成结果相似。如:焦玉木和田家怡 1996 年四季调查结果报道黄河口邻近海域浮游动物 78 种,其中桡足类种类最多(31 种)[6]。李自尚报道 2011 年春季黄河口邻近海域浮游动物 56 种,其中桡足类 15 种[11]。马静等报道 2007 年夏季黄河口邻近海域浮游动物 72 种,其中桡足类 10 种[8]。王文杰等报道 2010 年秋季黄河口邻近海域浮游动物 48 种,其中桡足类 18 种[10]。

优势种方面,本次调查浮游动物优势种与近年来国内学者单季度浮游动物优势种调查结果相似,如:李自尚报道 2011 年春季黄河口邻近海域浮游动物优势种为双刺纺锤水蚤、桡足类无节幼体、拟长腹剑水蚤和拟玲虫[11];马静等报道 2007 年夏季黄河口邻近海域浮游动物优势种为小拟哲水蚤、中华哲水蚤、强壮箭虫、双刺纺锤水蚤、柱头幼虫[8];王文杰等报道 2010 年秋季黄河口邻近海域浮游动物优势种为夜光虫、强额拟哲水蚤、小拟哲水蚤、背针胸刺水蚤、异体住囊虫、桡足类无节幼虫、双壳类幼体以及腹足类幼体等[10]。然而本研究与焦玉木和田家怡报道浮游动物优势种结果不一致,1996 年四季浮游动物调查显示主要浮游动物优势种为克氏纺锤水蚤、真刺唇角水蚤和强壮箭虫[6],而本研究发现小拟哲水蚤、双刺纺锤水蚤和拟长腹剑水蚤为四季调查主要浮游动物优势种;浮游幼虫包括双壳类幼体和多毛类幼体分别在春季和秋季航次调查中成为优势种,这也与以往研究使用浅水 I 型浮游生物网调查的结果不同[6, 15],而与使用浅水 II 型浮游生物网的调查结果相似[10-11]。

本次调查浮游动物丰度值与国内学者使用浅水 II 型浮游生物网调查结果相符合,而远远高于使用浅水 I 型浮游生物网调查结果。如:王文杰使用浅水 II 型浮游生物网调查黄河口邻近海域浮游动物,研究结果夏季浮游动物丰度平均值为 51839 个/m^3,秋季浮游动物丰度平均值为 37074 个/m^3[10];而马静等使用浅水 I 型浮

游生物网调查结果显示夏季浮游动物丰度平均值仅为 4770 个/m^3[8]。由于浅水 II 型浮游生物网网眼孔径远远小于浅水 I 型浮游生物网,更能真实反映调查海区小型浮游动物和浮游动物幼体的种类组成和数量。

本次调查表明浮游动物种类数和丰度均表现出明显的季节变化特征,优势种随季节变化明显。浮游动物种类数夏季最高,秋季和春季次之,冬季最低;浮游动物丰度夏季最高,春季和秋季次之,冬季最低。黄河口邻近海域浮游动物夏季丰度值最高,主要是小型桡足类(双刺纺锤水蚤、小拟哲水蚤、强额拟哲水蚤等)种群数量突然激增所致。Sun 等人对胶州湾浮游动物调查研究表明,双刺纺锤水蚤在胶州湾 5—6 月份出现爆发性增长,其可能原因为双刺纺锤水蚤在 4 月份的高产卵率导致种群数量激增,另外双刺纺锤水蚤休眠卵在海水温度达到 15℃后孵化也会导致种群数量增加[16]。而国内学者对小拟哲水蚤的季节变化开展较多研究,表明黄渤海小拟哲水蚤丰度夏季出现最高峰值[8,14-15,17-18],小拟哲水蚤同样在春末夏初具有最高的产卵率导致其种群数量急剧增加[18]。春季和秋季黄河口邻近海域夜光虫为主要优势种类,这与国内学者对不同海区的调查结果相似,如:王文杰和刘光兴报道 2010 年秋季黄河口邻近海域夜光虫为主要浮游动物优势种[10];张天文等报道胶州湾夜光虫的丰度高值出现在春季和秋季[19]。齐雨藻研究表明,北方海区夜光虫的适温范围为 16—27℃,适盐范围为 25—30[20],而本研究秋季的温度(平均值为 21.2℃)和盐度(平均值为 26.6)均在此范围,而春季盐度(平均值为 26.2)在此范围,温度却低于其适温范围,其丰度高值区温度平均值为 10.4℃,其出现高丰度值的夜光虫原因需待进一步研究。夏季和冬季夜光虫丰度值极低,可能由于海水温度过高或过低所致。

本研究与国内外温带河口海域浮游动物丰度的季节变化特征相似,浮游动物丰度一般在夏季达到高峰,春季或秋季次之,冬季最低[4-5]。例如:长江口的研究显示,长江口浮游动物丰度夏季最高,秋季较高,春季次之[21];南非 Kariega 河口海域浮游动物季节变化明显,夏季最高,春季和秋季次之,冬季最低[22];而在亚热带河口海域,浮游动物丰度的季节变化特征并不明显。例如:珠江口的研究结果表明,丰水期浮游动物平均丰度高于枯水期,盐度为影响浮游动物种类、丰度和生物量分布的主要因素[23];而九龙江口浮游动物种类数和丰度以春季最高,夏季次之,秋季最低,主要与海区盐度的季节性变化密切相关[24]。

3.2 黄河口邻近海域浮游动物空间变化特征

河口区浮游动物的空间分布受河口复杂环境的影响,如:海水温度、盐度、径流、海流、食物以及摄食等因素。本研究浮游动物丰度和环境因子的相关性结果表明,海水温度是影响黄河口附近海域浮游动物分布的重要因素。而浮游动物生物多样性指数均呈现从河口到外海升高的趋势,低值区位于黄河口入海口附近海区,这主要是因为入海口附近海域种类数少,并且夜光虫、双刺纺锤水蚤等优势种在该水域密集分布,进而导致生物多样性指数降低。

春季,浮游动物高丰度区位于黄河入海口两侧近岸海区,而外海区丰度至较低,表现出从近岸到外海降低的趋势,主要优势种夜光虫、双刺纺锤水蚤的丰度分布呈现相似的分布格局(图 2,图 3)。以往研究研究表明,夜光虫的水平分布与营养盐的分布具有正相关关系[19],黄河口附近海域较高的营养盐浓度有利于促进浮游植物的生长,进而导致夜光虫丰度的增加。夏季,随着黄河径流量的增大,黄河冲淡水向和河口偏东北方向移动[25],黄河冲淡水携带的营养盐导致黄河入海口附近海域和东北部海域营养盐浓度升高,促进浮游植物的生长,进而导致小型桡足类双刺纺锤水蚤、小拟哲水蚤等丰度增加。秋季,浮游动物高丰度区主要位于河口东部海区,与主要优势种夜光虫和小拟哲水蚤的丰度分布呈现一致的分布格局(图 2,图 3)。冬季,浮游动物丰度高值区位于河口东北部海区。

参考文献(References):

[1] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, Liu J P, Sun X X, Wang Y. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950—2005): Impacts of climate change and human activities. Global and Planetary Change, 2007, 57(3/4): 331-354.

[2] 崔毅, 马绍赛, 李云平, 邢红艳, 王梅胜, 辛福言, 陈聚法, 孙耀. 莱州湾污染及其对渔业资源的影响. 海洋水产研究, 2003, 24(1): 35-41.

[3] 孙丕喜, 王波, 张朝晖, 王宗灵, 夏滨. 莱州湾海水中营养盐分布与富营养化的关系. 海洋科学进展, 2006, 24(3): 329-335.
[4] 李开枝, 尹健强, 黄良民. 河口浮游动物生态学研究进展. 海洋科学, 2007, 31(3): 72-75.
[5] 杨宇峰, 王庆, 陈菊芳, 庞世勋. 河口浮游动物生态学研究进展. 生态学报, 2006, 26(2): 576-585.
[6] 焦玉木, 田家怡. 黄河三角洲附近海域浮游动物多样性研究. 海洋环境科学, 1999, 18(4): 33-38.
[7] 田家怡, 李洪彦. 黄河口附近海域浮游动物的分布特征及其与环境因子的关系. 海洋环境科学, 1985, 4(3): 32-41.
[8] 马静, 陈洪举, 刘光兴. 2007 年夏季黄河口及其邻近水域浮游动物的群落特征. 中国海洋大学学报, 2012, 42(5): 74-80.
[9] 巩俊霞, 杨秀兰, 段登选, 王志忠, 杜兴华, 张金路, 陈述江, 刘红彩, 陈金萍, 孙栋. 黄河入海口水域春季浮游动物群落特征研究. 广东海洋大学学报, 2010, 30(6): 1-6.
[10] 王文杰, 刘光兴. 2010 年秋季黄河口及其邻近海域中小型浮游动物的群落特征. 海洋科学, 2013, 37(11): 9-15.
[11] 李自尚. 春季黄河口及其邻近水域浮游动物群落特征与粒径谱的初步研究. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
[12] 白雪娥, 庄志猛. 渤海浮游动物生物量及其主要种类数量变动的研究. 海洋水产研究, 1991, (12): 71-92.
[13] 毕洪生, 孙松, 高尚武, 张芳. 渤海浮游动物群落生态特点 I. 种类组成与群落结构. 生态学报, 2000, 20(5): 715-721
[14] 毕洪生, 孙松, 高尚武, 张光涛. 渤海浮游动物群落生态特点 II. 桡足类数量分布及变动. 生态学报, 2001, 21(2): 177-185.
[15] 王克, 张武昌, 王荣, 高尚武. 渤海中南部春秋季浮游动物群落结构. 海洋科学集刊, 2002, (44): 34-42.
[16] Sun X H, Sun S, Li C L, Zhang G T. Seasonal and spatial variation in abundance and egg production of *Paracal anusparvus* (Copepoda: Calanoida) in/out Jiaozhou Bay, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 79(4): 637-643.
[17] 张芳, 孙松, 杨波, 吉鹏. 黄海小拟哲水蚤(*Paracal anusparvus*)丰度的季节变化. 海洋与湖沼, 2006, 37(4): 322-329.
[18] Sun X H, Sun S, Li C L, Zhang G T. Seasonal and spatial variability in egg production, abundance and production of small copepods in and near Jiaozhou Bay, China. Journal of Plankton Research, 2011, 33(5): 741-750.
[19] 张天文, 朱丽岩, 徐培培, 周浩, 戚本金. 胶州湾夜光虫丰度的季节变化和分布特征. 中国海洋大学学报, 2009, 39(S): 89-93.
[20] 齐雨藻. 中国沿海赤潮. 北京: 科学出版社, 2003: 209-213.
[21] 赖伟, 林温育, 堵南山. 长江口浮游动物生态的初步研究//第四次中国海洋湖沼科学会议论文集. 北京: 科学出版社, 1991: 158-163.
[22] 李开枝, 尹健强, 黄良民, 谭烨辉, 许战洲. 珠江口浮游动物的群落动态及数量变化. 热带海洋学报, 2005, 24(5): 60-68.
[23] 叶又茵, 王雨, 林茂. 九龙江河口浮游动物的群落结构和时空变动. 生态科学, 2013, 32(4): 408-419.
[24] Froneman P W. Seasonal changes in zooplankton biomass and grazing in a temperate estuary, South Africa. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, 52(5): 543-553.
[25] Wang Y H, Liu Z, Gao H W, Ju L, Guo X Y. Response of salinity distribution around the Yellow River mouth to abrupt changes in river discharge. Continental Shelf Research, 2011, 31(6): 685-694.